Proceedings of the XVII ECSMGE-2019
Geotechnical Engineering foundation of the future
ISBN 978-9935-9436-1-3
© The authors and IGS: All rights reserved, 2019
doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0075

XVII European Conference
ECSMGE 2019
Reykjavík
on Soil Mechanics
and Geotechnical Engineering

Essai au laboratoire sur le renforcement des granulats par géosynthétique dans les applications des routes non revêtues reposant sur des sols de faible portance

Laboratory test on agregats geosynthetic reinforcement for unpaved roads on soft subgrade applications.

Nicole Khoueiry
Université de Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, Villeurbanne, France
Laurent Briançon, Ali Daouadji
Université de Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, Villeurbanne, France
Abdelkader Abdelouhab
Texinov, La Tour-du-Pin, France

RÉSUMÉ: Les géosynthétiques sont couramment utilisés en géotechnique pour remplacer les méthodes traditionnelles. Dans la construction des routes non revêtues reposant sur des sols de faible portance, le renforcement par géosynthetique permet la réduction de l'épaisseur de la couche de granulat. Un essai au laboratoire à échelle réelle est conçu et développé pour caractériser l'effet des géosynthétiques dans le renforcement des granulats sur des sols de faible portance. Un simulateur accélérateur de Trafic (SAT) est développé pour simuler une charge roulante cyclique verticale sur la surface d'une plateforme renforcée. Cette dernière est placée dans un banc d'essai (5 m x 1,9 m x 1,4 m). Dans cet article, l'appareil et le protocole expérimental sont décrits. Afin de caractériser le comportement à l'interface sol/géosynthétiques, des essais à la boite de cisaillement ont été réalisés. Deux séries d'essais sans et avec renforcement ont été effectués. Les résultats montrent que la géogrille augmente la contrainte de cisaillement maximale à l'interface. Le rapport de frottement α qui est le rapport entre la contrainte de cisaillement à l'interface sol/géosynthétique et la contrainte de cisaillement dans le sol varie entre 1,06 et 1,27.
Mots-clés: Géosynthétiques, Routes non revêtues, Renforcement, Essai de cisaillement simple

ABSTRACT: Geosynthetics were widely used in geotechnical engineering to replace the traditional methods. In the unpaved roads constructions on soft subgrade, the geosynthetic reinforcement is used allowing the reduction of the base course layer thickness. A large-scale laboratory test was designed to characterize the geosynthetics effects and reinforcement mechanisms in unpaved roads. A simulator accelerator of traffic (SAT) was developed to simulate a cyclic traffic load circulation on the top of a reinforced platform. The latter was placed inside a large geotechnical testing box (5 m x 1,9 m x 1,4 m). In this paper, the apparatus and the protocol procedure are described. In order to characterize the interface behaviour soil/geosynthetics, a large scale direct shear tests were performed. Two tests series with and without geogrid were performed. The results show that the geogrid increase the ultimate shear stress at the interface. The interfacial shear strength efficiency coefficient α, which is the ratio between the maximum shear stress with and without reinforcement, range between 1.06 and 1.27.
Keywords: Geosynthetics, Unpaved roads, Reinforcement, direct shear box test

1 INTRODUCTION

Les constructions routières non revêtues sur des sols de faible portance entrainent des problèmes vis-à-vis les déformations excessives en surface. Les géosynthétiques ont été utilisés dans le renforcement des plateformes granulaires reposant sur les sols compressibles depuis les années 1970. Durant ces années, la performance du renforcement par géosynthétiques de ces ouvrages a été mise en évidence.

Les géosynthétiques dans ces ouvrages peuvent assurer plusieurs fonctions, comme la séparation et le renforcement. La fonction de séparation est généralement assurée pas les géotextiles. La fonction de renforcement permet (1) la réduction des contraintes de cisaillement dans le sol de faible portance, (2) la redistribution des contraintes normales dans le sol de faible portance, (3) l'augmentation de la capacité portante due au confinement du mouvement latéral à l'interface entre le sol de faible portance et la plateforme granulaire, (4) l'augmentation de la capacité portante et la réduction des contraintes due à l'effet membrane développé dans le renforcement sous des déplacements importants, (5) le blocage des déplacements latéraux dans la plateforme granulaire.

Dans le cadre de cette présente étude, un protocole expérimental a été développé pour tester les plateformes routières non revêtues renforcées par géosynthétiques et reposant sur des sols de faible portance. Un appareil SAT (Simulateur Accélérateur de Trafic) a été développé dans ce but. Cet appareil applique la charge roulante cyclique sur une longueur de 2 m effective. La conception de la machine et le protocole expérimental sont détaillés dans cette communication.

Des essais à la boite de cisaillement ont été effectués pour caractériser l'interface granulats/géosynthétique et pour apporter des éléments de compréhension du mécanisme à l'interface qui engendre le comportement des plateformes granulaires renforcées sur des sols de faible portance. Des essais sans géosynthétique et des essais avec géogrille ont été effectués. Les résultats des essais sont présentés dans cette communication.

2 ETAT DE L'ART

Plusieurs auteurs dans la littérature ont étudié ces ouvrages pour apporter des éléments de compréhensions sur ces phénomènes complexes contribuant au mécanisme de renforcement. Gabr (2001), Kim et al. (2006), Palmeira & Antunes (2010), Qian et al. (2011, 2013) ont proposé des essais cycliques sur plaque pour tester les plateformes granulaires renforcées surmontant un sol de faible portance. Les déplacements en surface, les déformations et les contraintes dans le sol de faible portance ont été mesurés lors de ces essais. Les résultats ont permis de comparer l'effet de différents types de géosynthétiques. Maxwell et al. (2005), Hufenus et al. (2006), Cuelho & Perkins (2009), Cuelho et al. (2014) ont effectué des essais à échelle réelle in situ. Les conditions de ces essais s'approchent plus de la réalité, mais leur mise en place de la plateforme reste compliquée et le nombre de cycles de chargement reste limité. Dans le but de représenter le chargement roulant lourd sur des chaussées revêtues ou non revêtues, des appareils accélérateurs de trafic ont été développés. L'appareil PFT (Pavement Test Facility) a été utilisé par Watts et al. (2004) et Cook et al. (2016) pour des essais sur des plateformes renforcées par des géosynthétiques. Les plateformes à tester sont placées dans une fosse de 25 m de long, 10 m de large et 3 m de profondeur. A chaque essai cette fosse est divisée en plusieurs sections, chacune renforcée par un type de géosynthétiques différents. Les deux roues appliquent une charge de 40 kN sur la surface de la section et la plateforme est soumise à 10 000 cycles avec une déformation maximale en surface de 80 mm. Watts et al. (2004) ont conclu que la

méthode de dimensionnement empirique de Giroud et Noiray (1981) amène à un surdimensionnement pour tous les produits qu'ils ont testés. Cook et al. (2016) ont performé 93 essais sur différents produits, et ont conclu que le mécanisme de confinement domine le phénomène de renforcement. Le simulateur de trafic lourd du U.S. Army Engineer Research and Development Center a été utilisé par Jersey et al. (2012) et Norwood & Tingle (2014) pour tester des plateformes routières revêtues et non revêtues renforcée par géosynthétiques sur des sols de faible portance. Jersey et al. (2012) ont utilisé ce dispositif pour tester des routes revêtues. Norwood & Tingle (2014) ont testé des routes non revêtues renforcées par de géogrilles, et les résultats mettent en évidence l'efficacité du renforcement.
Les appareils de simulation de trafic accéléré ont apporté de nombreux résultats dans le domaine routier. Cependant, la préparation des plateformes d'essais reste une procédure longue et demandant un soin particulier pour obtenir des conditions d'essais répétables.

Le comportement de la plateforme renforcée est piloté par les phénomènes complexes développés à l'interface entre le géosynthétique et les granulats. Le comportement de l'interface ne dépend pas seulement des propriétés des granulats, des propriétés du géosynthétique et de l'état de contrainte mais aussi de la méthode d'essai (Sayeed et al. 2014). Dans la littérature plusieurs auteurs ont utilisé l'essai à la boite de cisaillement pour caractériser l'effet du renforcement et comparer le comportement à l'interface avec et sans renforcement. Liu et al. (2009) ont étudié l'effet des bandes transversales sur l'interaction sol-géosynthétique en se basant sur les résultats de la boite de cisaillement. Ils ont comparé l'effet du renforcement du sable par géotextile et par géogrille en comparant le rapport de frottement (α) :

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{sol-géosynthétique}}}{\tau_{\text{sol}}} \quad (1)$$

Les résultats montrent que la contrainte de cisaillement maximale sable-géogrille est plus importante que la contrainte de cisaillement maximale sable-géotextile.
Sakleshpur et al. (2017) ont étudié l'effet de la dimension des ouvertures et de la résistance des nœuds sur l'interaction géogrille-granulats en se basant sur les résultats de la boite de cisaillement. Un sol de faible portance a été placé dans la boite inferieure surmontée par un sol granulaire dans la boite supérieure. Plusieurs géogrilles ont été testés en variant la dimension des ouvertures et la résistance des nœuds. Les résultats de ces essais montrent une variation du coefficient α entre 0,96 et 1,48, et les auteurs ont conclu que la dimension des ouvertures et de la résistance des nœuds ont une grande influence sur les caractéristiques de l'interface.
Han et al. (2018) ont étudié l'effet de la dimension des ouvertures par rapport à la dimension des granulats sur le comportement de l'interface. Des essais à la boite de cisaillement ont été effectués en utilisant 3 types de granulats avec des dimensions de particules différentes et deux types de géogrilles. Le coefficient α des essais effectués dans cette étude varie entre 0,78 et 1,01.
Arulrajah et al. (2014) ont effectué des essais à la boite de cisaillement pour caractériser l'interface entre des granulats recyclés et des géogrilles. Deux séries d'essais ont été réalisées en changeant la position du géosynthétique. Pour la première série les géogrilles ont été placées directement sur le plan de cisaillement, pour la deuxième série les géogrilles ont été décalées de 7 mm au-dessous du plan de cisaillement. Les résultats des essais montrent que lorsque le géosynthétique est placé à 7 mm au-dessous du plan de cisaillement, les caractéristiques de l'interface sont plus élevées.

3 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le sol de 60 cm d'épaisseur et la plateforme granulaire de 30 cm sont placés dans un bac de 5 m de long, 1,9 m de large et 1 m de haut.

3.1 Matériaux

Un mélange de sable et d'argile est utilisé pour simuler le sol de faible portance et pouvoir à chaque essai reconstituer le même sol. Pour déterminer le type d'argile et le pourcentage du mélange constituant le sol de faible portance, deux types d'argiles ont été testés : une argile Bentonite et une argile Kaolinite. Pour chaque argile trois différents mélanges ont été testés : M1(25 % Argile 75 % de sable), M2 (30% d'argile et 70 % de sable), M3 (40 % d'argile et 60 % de sable). Pour chaque mélange les courbes Proctor et CBR ont été tracées. La teneur en eau sous laquelle il faut compacter le sol pour obtenir un CBR de 2% a été déterminée (CBR<3% selon FHWA). Le mélange 25 % kaolinite 75 % sable a été choisi pour cette application puisque ce mélange donne un CBR de 2% pour une teneur en eau éloignée de la saturation.

Une grave non traitée (GNT 0/31.5) est utilisée dans la plateforme granulaire. Les essais de caractérisation de ce sol ont été effectués et les résultats sont présentés en détails dans la section 4.1.

A l'interface entre les deux sols, un géotextile non tissé (70 g/m^2) est placé pour faciliter le démontage et la réutilisation du sol granulaire sans le polluer.

Un essai de référence sans géosynthétique sera initialement réalisé. Des essais avec différentes géogrilles seront réalisés (géogrille tricotée, géogrille extrudée, géogrille soudée…) dans le but de comparer leur efficacité par rapport à l'essai de référence

3.2 Mise en place et contrôle de qualité

Le sol de faible portance est constitué par un mélange du sable et d'argile à une teneur en eau de 11%. Un malaxeur spécifique est utilisé pour réaliser ce mélange d'une façon homogène et répétable.

Dans le but de déterminer un bon protocole de mise en place du sol de faible portance, plusieurs protocoles de compactage ont été testés pour obtenir une couche de sol de faible portance homogène sur son épaisseur. Chaque protocole correspond à un nombre de couches compactées, à une masse de sol par couche et à un nombre de passages du compacteur par couche. Pour chaque protocole, des essais de contrôles ont été réalisés sur le sol mis en place : mesure de la teneur en eau, essais scissométriques, essais pénétrométriques statiques et dynamiques dont les résultats sont corrélés au CBR.

3.3 Instrumentation

Durant les essais, la plateforme est instrumentée par différents capteurs : un capteur à visée laser pour mesurer le déplacement en surface, des capteurs de pression totale pour mesurer la distribution de la contrainte et des capteurs de tassement pour évaluer les déformations dans le sol de faible portance.

La nappe de géogrille est elle aussi instrumentée par une fibre optique permettant une mesure répartie de la déformation. La technologie utilisée pour mesurer la déformation se fait par la technologie de la rétrodiffusion Rayleigh grâce à un montage optique fondé sur la réflectométrie fréquentielle OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry).

3.4 Appareil

Un simulateur accélérateur de trafic (SAT) a été développé pour simuler une charge cyclique roulante à la surface de la chaussée non revêtue renforcée par géosynthétiques.

Cet appareil simule un trafic unidirectionnel, sous chargement normal de 40 kN ce qui correspond à la charge d'un demi-essieu (ESAL : Equivalent Single Axle Loads) (AASHTO, 1993), avec une contrainte au contact roue-surface de 565 kPa. Le SAT applique cette charge sur 2 m de long en dehors des zones tampons. Les structures routières non revêtues sont soumises à 10 000 cycles, avec une profondeurs maximale d'orniérage de 75 mm (FHWA, 2008). La vitesse de circulation de la roue est fixée entre 7 et 10 km/h.

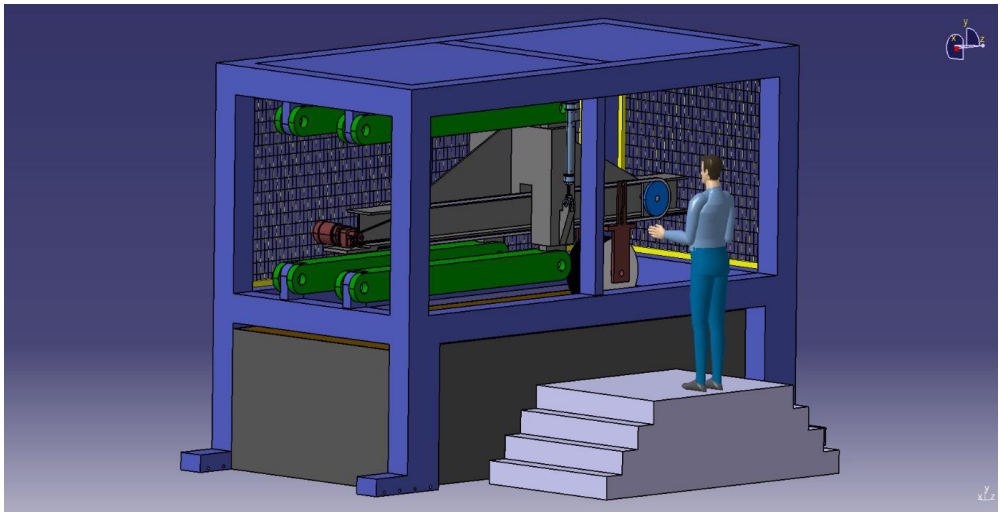


Figure 1. Illustration de l'appareil SAT

4 ESSAIS A LA BOITE DE CISAILLEMENT

Le comportement à l'interface géosynthétiques-granulats influence la réponse globale de la plateforme renforcée. En effet, la présence du renfort à l'interface réduit les contraintes de cisaillement et les contraintes normales dans le sol de faible portance. Dans le but d'apporter des éléments de compréhension des phénomènes complexes développés à l'interface, des essais à grande échelle à la boite de cisaillement ont été performés. Deux séries d'essais ont été réalisées, une série avec les granulats seulement, une série avec une géogrille tricotée à l'interface. Pour chaque série trois états de contrainte normale ont été testés, 66 kPa, 126 kPa et 200 kPa. L'essai avec 200 kPa de contrainte normale est l'essai qui se rapproche le plus à l'état de contrainte normale à l'interface géogrille/granulats dans l'application des plateformes routières non revêtues soumises au chargement de trafic.

4.1 Matériaux

4.1.1 Granulats

La grave utilisée dans ces essais est la grave de la plateforme granulaire des essais de trafic. Il s'agit d'une la Grave Non Traitée (GNT) 0/31.5. C'est une grave mal graduée (Gm) selon la classification LPC (Cu = 20, Cc = 5). La courbe granulométrique est présentée à la Figure 2.

Le sol a été compacté dans la boite de cisaillement par la dame Proctor d'une façon à avoir une densité sèche de 17 kN/m^3 correspondant à celle de la plateforme granulaire mise en place dans l'essai de trafic.

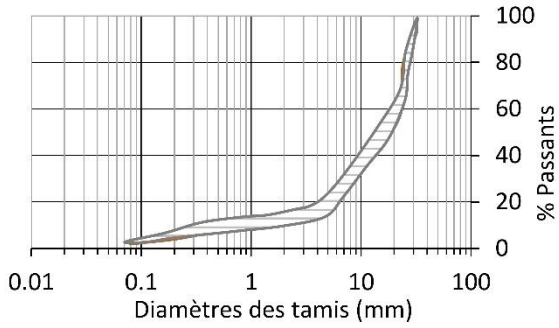


Figure 2. Fuseau granulométrique de la grave.

4.1.2 Géosynthétique

Une géogrille tricotée enduite avec des ouvertures de 40 mm est utilisée dans ces essais (Table 1).

Tableau 1. Propriétés de la géogrille.

Produits	Matière	J*(kN/m) à 2%	Résistance en traction (kN/m)	
			SP	ST
Géogrille	PET	1000	100	100

J: La rigidité à 2 % de déformation.

4.2 Appareil

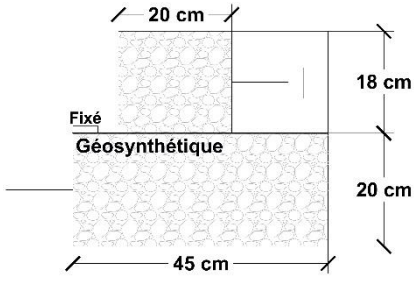


Figure 3. Illustration de la boite de cisaillement.

La boite inférieure fait 0,45 m de long, 0,20 m de large et 0,2 m de haut, tandis que la boite supérieure fait 0,2 m de long, 0,2 m de large et 0,18 m de haut, ce qui fait que durant l'essai la surface du plan de cisaillement reste constante de 0.04 m² (Figure 3). La vitesse de déplacement de la boite inférieure est de 1 mm/min.

4.3 Résultats

Les courbes représentants la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les deux interfaces, granulats-granulats et granulats-géogrille sont illustrées dans la Figure 4. Les courbes dans tous les cas ne présentent pas de pic, mais présentent une asymptote qui correspond à un état de plastification de l'interface. En effet, comme les graphiques le montrent, les six courbes ont la même allure: un comportement très raide pour la partie élastique suivis par une asymptote plastique. La présence de la géogrille augmente la contrainte de cisaillement maximale dans chaque état de contrainte normale.

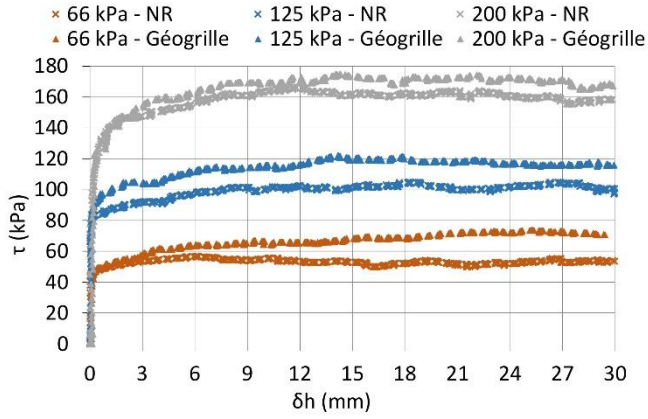


Figure 4. Contrainte de cisaillement - déplacement horizontal.

L'interaction entre les granulats et la géogrille est caractérisée par trois mécanismes : le frottement entre le sol et les bandes de la géogrille, le frottement entre le sol et le sol (dans les ouvertures) et la résistance des bandes transversales. Les résultats de ces essais montrent que le renforcement du plan de cisaillement par une géogrille ne change pas l'allure de la courbe « contrainte de cisaillement – déplacement horizontale » mais augmente la résistance maximale en cisaillement

de ce plan. On peut conclure alors que le frottement sol-sol reste dominant dans ce cas, mais la présence des bandes transversales limite le déplacement des particules imbriquées dans les ouvertures ce qui augmente la résistance maximale en cisaillement.

Tableau 2. Rapport de frottement

Contrainte normale (kPa)	α
66	1,27
125	1,2
200	1,06

La contrainte maximale de cisaillement passe de 55 kPa à 70 kPa dans le cas de 66 kPa de contrainte normale. Le rapport de frottement α varie entre 1,06 et 1,27 (Tableau 2). On peut constater que plus la contrainte normale augmente plus le coefficient α diminue.

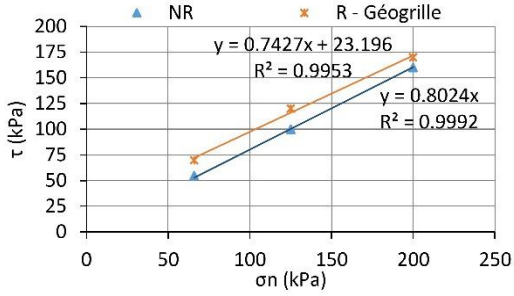


Figure 5. Contrainte de cisaillement maximale – contrainte normale.

Le critère de rupture de Mohr-Coulomb a été utilisé pour déterminer les caractéristiques c- φ des interfaces grave-grave et grave-géogrille.

$$\tau = \sigma \times \tan\varphi + c \qquad (2)$$

En traçant les courbes des contraintes de cisaillement maximale en fonction des contraintes normale (Figure 5), on peut déterminer c-φ pour chaque interfaces. Pour l'interface granulats - granulats la cohésion est nulle, et l'angle de frottement est de 39°. Tandis qu'avec le renforcement la cohésion de l'interface passe à 23 kPa et l'angle de frottement à 37°.On peut conclure alors, que la présence de la géogrille à l'interface apporte une cohésion à celle-ci.

5 CONCLUSION

Un protocole expérimental a été développé pour tester les plateformes renforcées par géosynthétiques sur des sols de faible portance. Un appareillage (SAT) a été conçu pour appliquer une charge roulante cyclique sur ces plateformes. Une attention particulière a été portée à la constitution, la mise en place et le contrôle du sol de faible portance, pour avoir un essai répétable et pouvoir comparer les résultats des différents essais. Durant chaque essai, l'orniérage, la distribution de la contrainte dans le sol et la déformation du géosynthétique seront mesurés. En se basant sur ces mesures, l'efficacité du renforcement géosynthétique pourra être évaluée.

En parallèle durant l'étape de préparation du protocole expérimentale expliqué ci-dessus, des essais de caractérisation des matériaux ont été effectués, et plus précisément des essais de caractérisation de l'interface géogrille/granulats. En effet, le comportement à l'interface géogrille/granulats influence la réponse globale de la plateforme granulaire surmontant le sol de faible portance. Le phénomène complexe développé à l'interface dépend des propriétés des granulats, des propriétés du géosynthétique, de l'état de contrainte et de de la méthode d'essai. La boite de cisaillement à échelle réelle a été utilisée pour caractériser l'interface. Le matériau granulaire et la géogrille qui seront utilisé dans les essais de Trafic ont été testés.

Le sol granulaire renforcé par une géogrille et non renforcé a été testé au cisaillement. Les résultats à la boite de cisaillement montrent l'efficacité du renforcement par la géogrille. En effet la présence de la géogrille augmente la contrainte

de cisaillement maximale. Le rapport de frottement α varie entre 1,06 et 1,27. Les résultats montrent que les granulats ont une cohésion nulle et un angle de frottement de 39°, tandis que l'interface agrégats – géogrille a une cohésion de 23 kPa et un angle de frottement de 37 °.

La caractérisation de l'interface géogrille/granulats montre que la présence de la geogrille apporte une cohésion à l'interface. Dans le comportement global de la plateforme granulaire reposant sur un sol de faible portance et soumise au chargement de Trafic, cet apport de cohésion à l'interface pourra améliorer la diffusion de contrainte normale et réduire les contraintes de cisaillement sur le sol de faible portance.

6 REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche se fait dans le cadre du LabCom PITAGOR associant le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et la société TEXINOV. Ce LabCom est soutenu financièrement par l'ANR pour une durée de trois ans.Ce travail se fait dans le cadre d'une thèse CIFRE soutenue financièrement par l'ANRT.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AASHTO, 1993. AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures, In p. II-69.

Cook, J., Dobie, M., & Blackman, D. (2016). The development of APT methodology in the application and derivation of geosynthetic benefits in roadway design. In The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability (pp. 257-275). Springer, Cham.

Cuelho, E., Perkins, S., & Morris, Z. (2014). Relative Operational Performance of Geosynthetics Used as Subgrade Stabilization (No. FHWA/MT-14-002/7712-251).

FHWA, 1998. Geosynthetic Design and Construction Guidelines. In p. 150.

Gabr, M. (2001). Cyclic plate loading tests on geogrid reinforced roads. Research Rep. To Tensar Earth Technologies, Inc.

Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S. M., & Brönnimann, R. (2006). Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. Geotextiles and Geomembranes, 24(1), 21-37.

Jersey, S., Tingle, J., Norwood, G., Kwon, J., & Wayne, M. (2012). Full-scale evaluation of geogrid-reinforced thin flexible pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2310), 61-71.

Kim, W. H., Edil, T., Benson, C., & Tanyu, B. (2006). Deflection of prototype geosynthetic-reinforced working platforms over soft subgrade. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1975), 137-145.

Maxwell, S., Kim, W., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2005). Effectiveness of geosynthetics in stabilizing soft subgrades. TRANSPORTATION.

Norwood, G. J., & Tingle, J. S. (2014). Performance of Geogrid-Stabilized Flexible Pavements. US Army Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory.

Palmeira, E. M., & Antunes, L. G. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. Geotextiles and Geomembranes, 28(6), 547-558.

Qian, Y., Han, J., Pokharel, S. K., & Parsons, R. L. (2012). Performance of triangular aperture geogrid-reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(8), 1013-1021.

Qian, Y., Han, J., Pokharel, S., & Parsons, R. (2011). Stress analysis on triangular-aperture geogrid-reinforced bases over weak subgrade under cyclic loading: an experimental study. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2204), 83-91.

Sayeed, M. M. A., Ramaiah, B. J., & Rawal, A. (2014). Interface shear characteristics of jute/polypropylene hybrid nonwoven geotextiles and sand using large size direct shear test. Geotextiles and Geomembranes, 42(1), 63-68.

Watts, G. R. A., Blackman, D. I., & Jenner, C. G. (2004). The performance of reinforced unpaved sub-bases subjected to trafficking.